

# 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性

## 光度曲線の系統的調査に基づく 重力崩壊型超新星の爆発機構への制限

齋藤 晟 (東北大学)

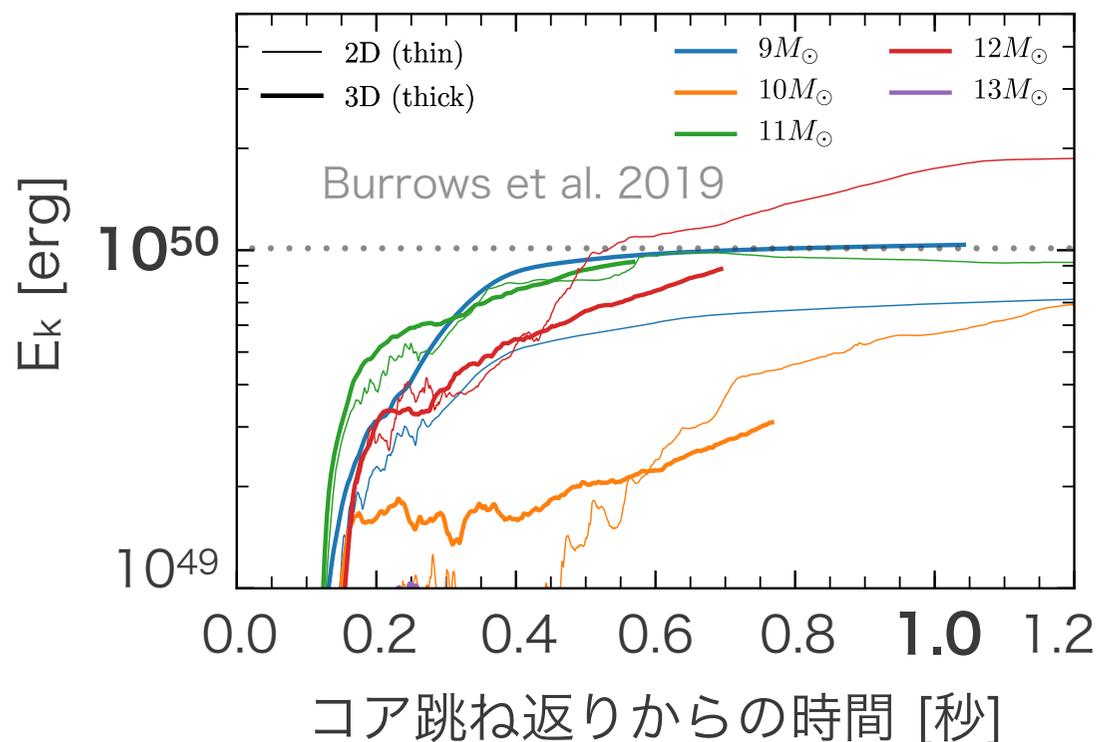
田中 雅臣 (東北大学)

澤田 涼 (東京大学)

守屋 堯 (国立天文台)

- 観測の典型値： $E_k \sim 10^{51}$  erg ( $\sim Mv^2$ )
- 第一原理計算： $E_k \sim 10^{50}$  erg (計算に時間がかかる)  
( $\geq 1.0$  秒)

第一原理計算：運動エネルギー

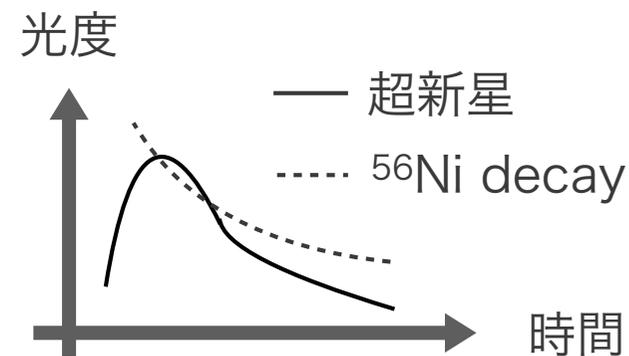


**爆発のメカニズムが未解明**

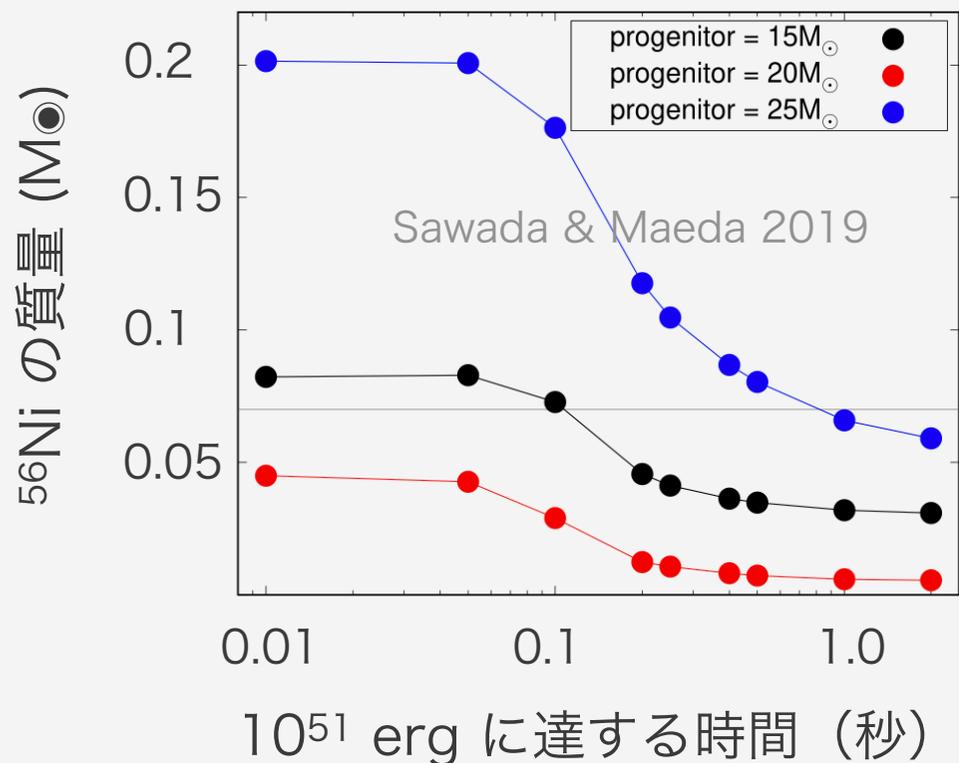
→ 観測から制限したい

超新星爆発時に放射性元素  $^{56}\text{Ni}$  を合成

- 観測：ピークの明るさ（測りやすい）
- 理論：中心付近のみで合成（短時間で計算可）



爆発のタイムスケール毎の  $^{56}\text{Ni}$  の質量



$^{56}\text{Ni}$  の質量

爆発のタイムスケールに依存

※ 典型的な親星のみ考慮

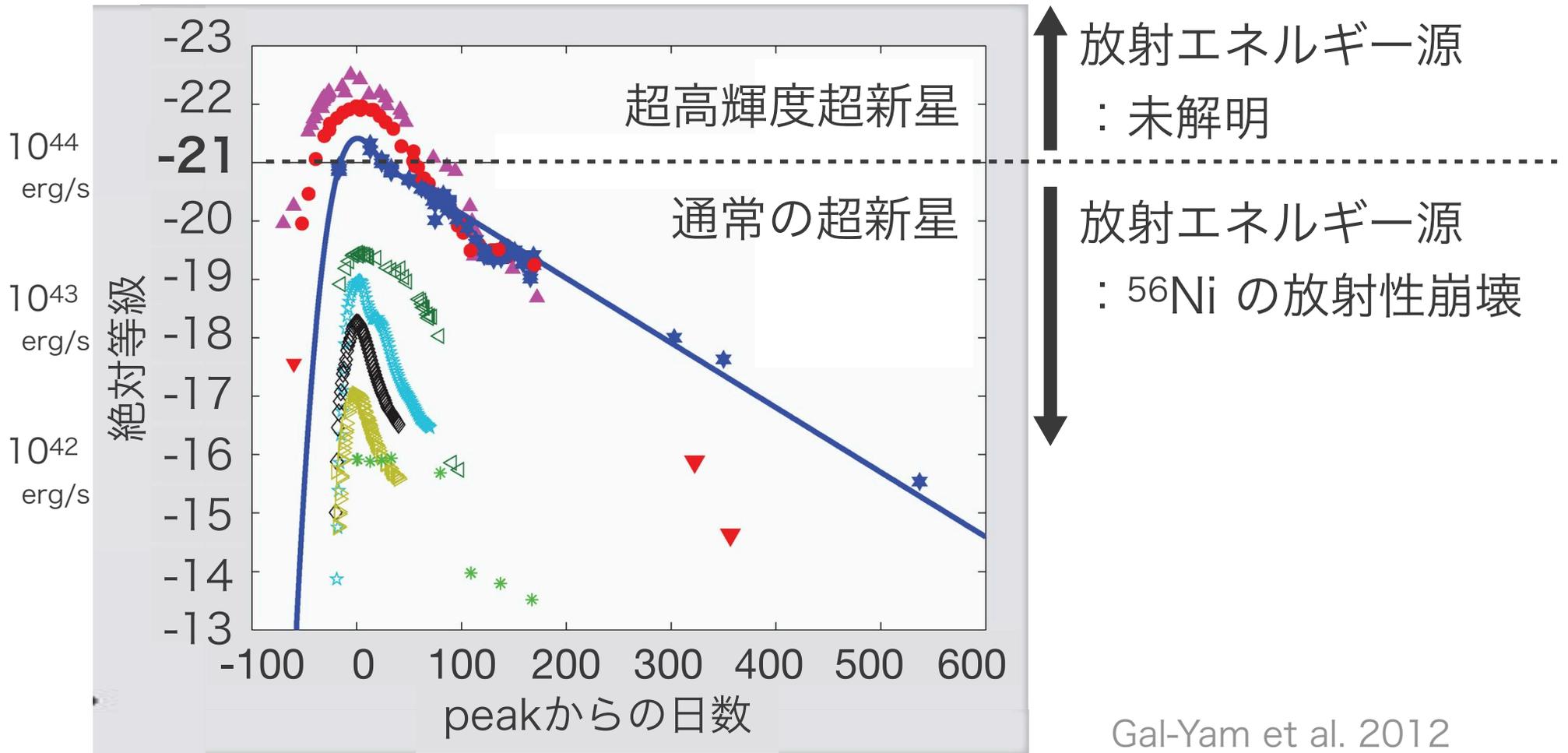
目的：

観測 & 理論

； 親星を加味、 $^{56}\text{Ni}$  の比較

→ タイムスケールに制限

超新星の光度曲線



～ - 20 mag の天体 → どこまでが  $^{56}\text{Ni}$  で光る通常の超新星か？

Arcavi et al. 2016, De Cia et al. 2018, Prentice et al. 2021, Matsuda in prep

$^{56}\text{Ni}$  の合成量  $M_{\text{Ni}}$ 、爆発のタイムスケール  $t_{\text{grow}}$

- 爆発のメカニズムは？
- どこまでが  $^{56}\text{Ni}$  で光る「通常」の超新星か？

超新星の光度曲線から  $^{56}\text{Ni}$  の合成量を系統的に調査

流体・元素合成計算（親星の構造・爆発のタイムスケール）

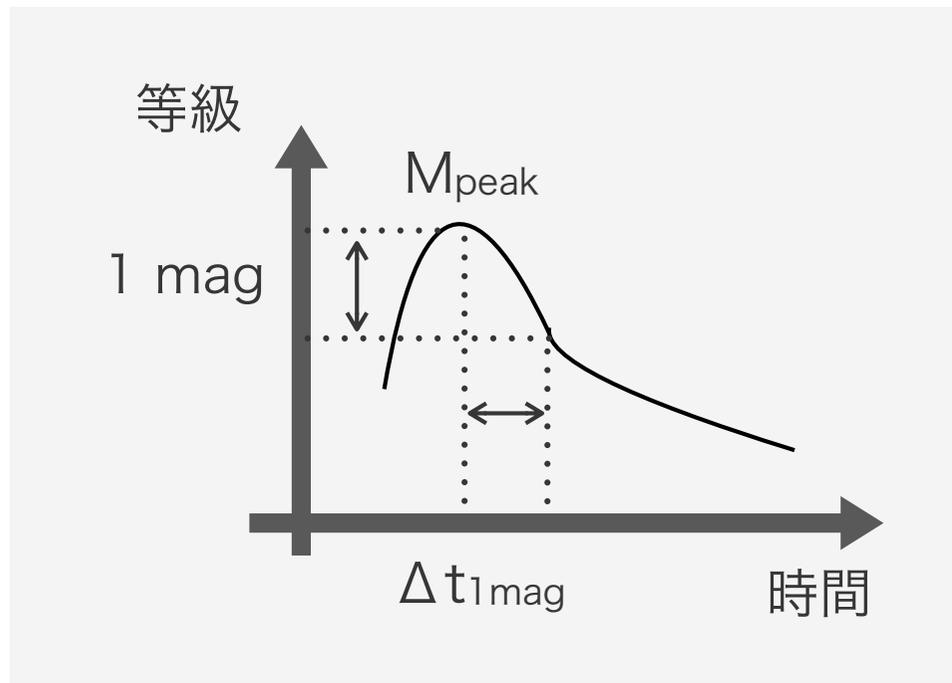
→  $^{56}\text{Ni}$  で光る超新星の明るさの上限値

爆発のタイムスケールへの制限

Open Supernova Catalog e.g., Guillochon et al. 2017

: 85 個の stripped-envelope 超新星の bolometric 光度曲線

- ピーク等級 ( $M_{\text{peak}}$ )  $\rightarrow$   $^{56}\text{Ni}$  の質量 ( $M_{\text{Ni}}$ )
- 減光のタイムスケール ( $\Delta t_{1\text{mag}}$ )  $\rightarrow$  エジェクタの質量 ( $M_{\text{ej}}$ )

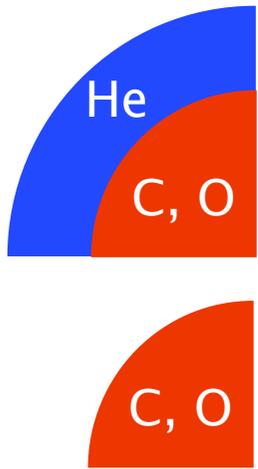


$$t_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{3\kappa M_{\text{ej}}}{4\pi c v_{\text{ej}}}} \propto M_{\text{ej}}^{1/2} v_{\text{ej}}^{-1/2}$$

Arnett 1982

$$(v_{\text{ej}} \sim 10,000 \pm 2,000 \text{ km/s})$$

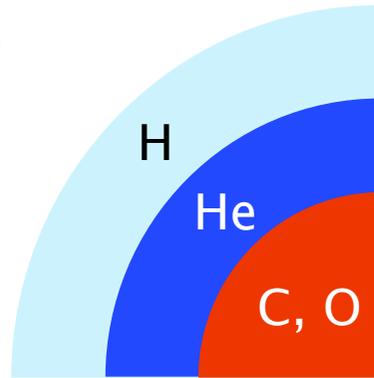
e.g., Lyman et al. 2016



Stripped envelope (Ib, Ic)

放射エネルギー源

•  $^{56}\text{Ni}$



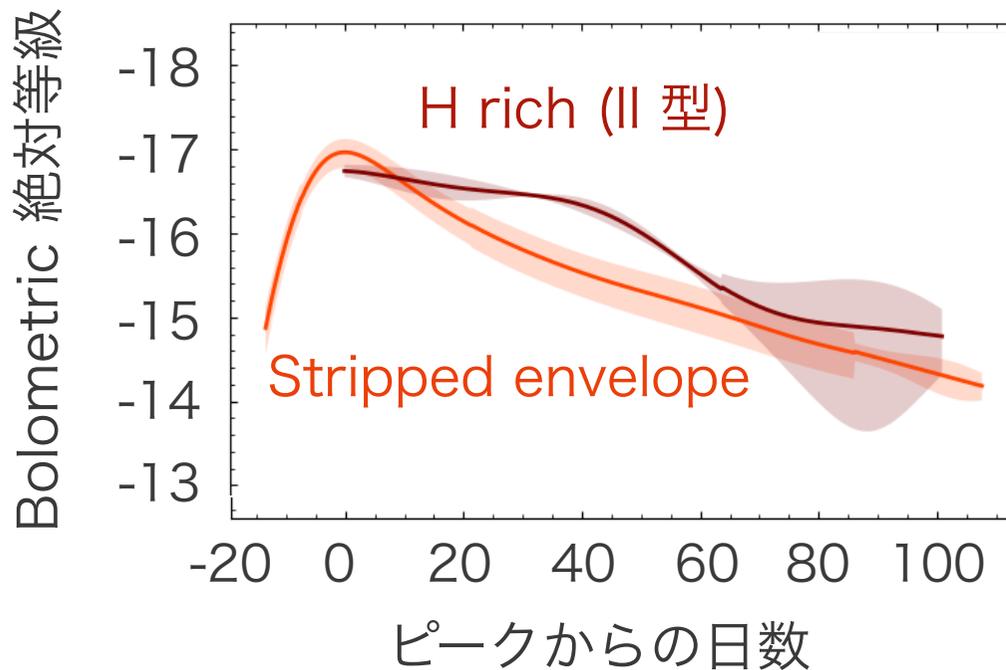
H rich (II 型)

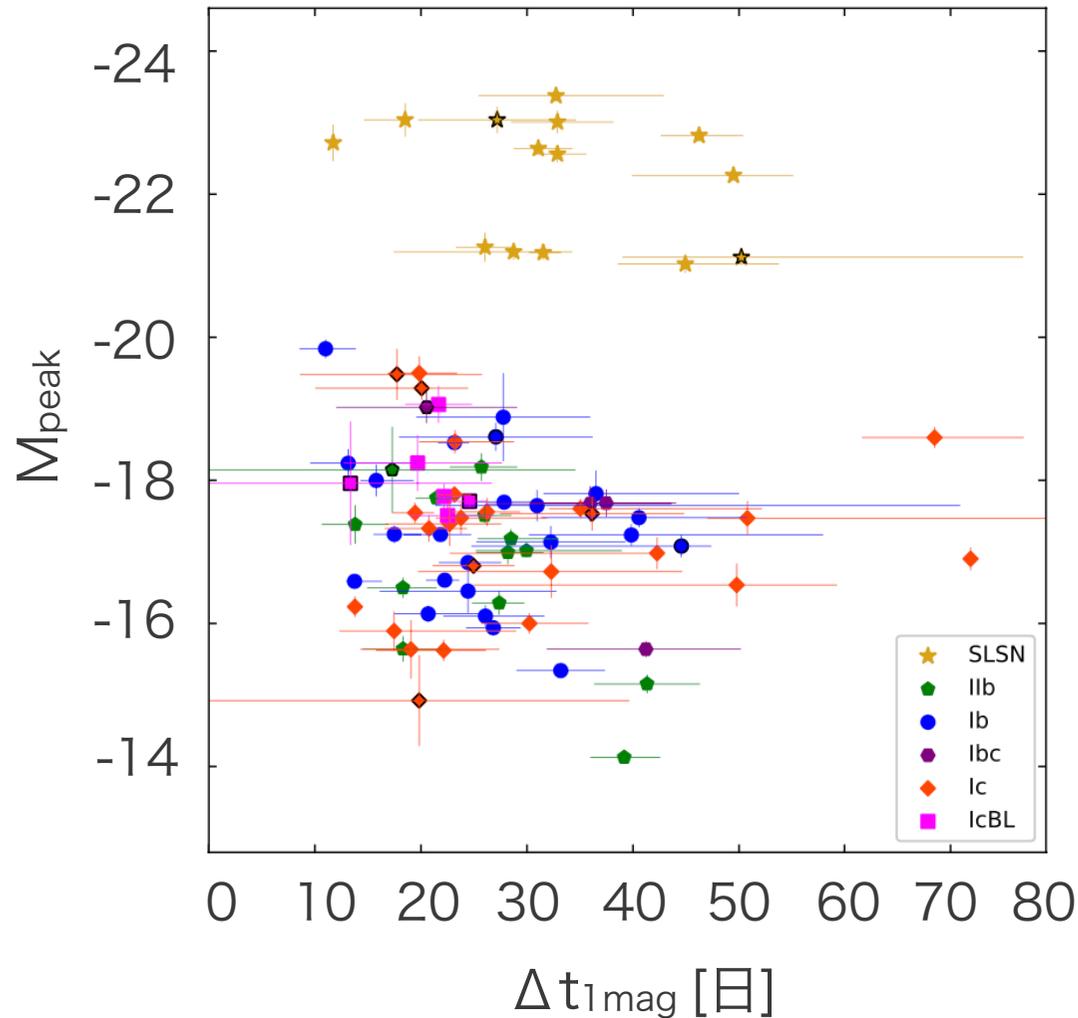
放射エネルギー源

•  $^{56}\text{Ni}$

• 内部エネルギー

光度曲線





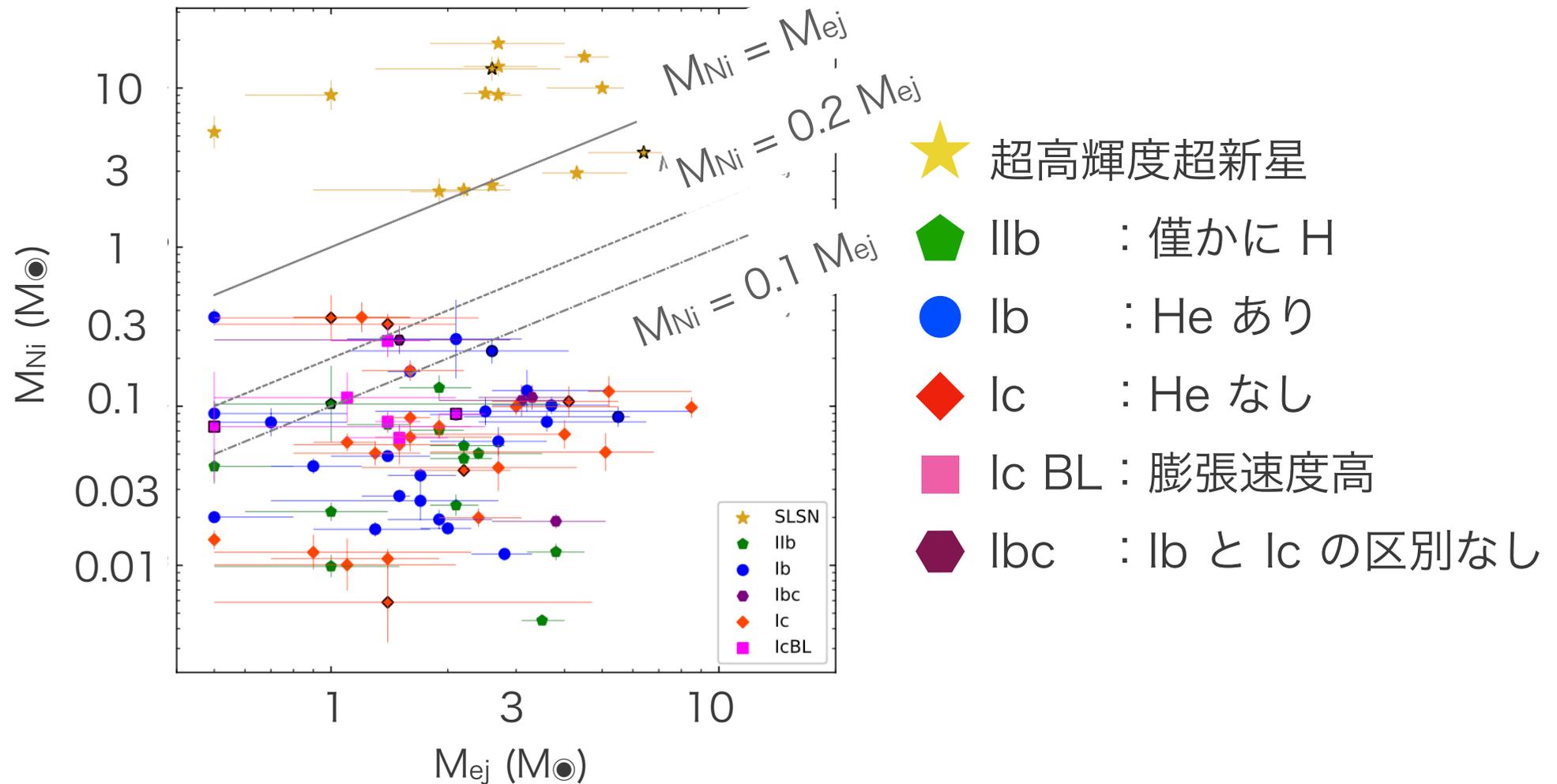
- ★ 超高輝度超新星
- IIb : 僅かに H
- Ib : He あり
- ◆ Ic : He なし
- Ic BL : 膨張速度高
- ◆ Ibc : Ib と Ic の区別なし

$\Delta t_{1\text{mag}}$  と  $M_{\text{peak}}$  に相関なし ( $p \sim 0.15$ )

→ 先行研究 (Taddia et al. 2018; 34天体 など) と無矛盾

$\Delta t_{1\text{mag}} \rightarrow M_{\text{ej}}$

$M_{\text{peak}} \rightarrow M_{\text{Ni}}$



- 超高輝度超新星は  $M_{\text{Ni}} \gtrsim M_{\text{ej}}$
- 一部の超新星は高い  $M_{\text{Ni}} \sim 0.2 M_{\text{ej}}$

$M_{\text{ej}}, M_{\text{Ni}}$   
 → 爆発のタイムスケール

1D 流体計算 (blcode) Morozova et al. 2015

21核種の元素合成計算 Timmes et al.

① 爆発直前の星 Sukhbold et al. 2016

$$M_{\text{爆発直前}} = M_{\text{ej}} + 1.4 M_{\odot}$$

$$M_{\text{ej}} = 1, 2, 3, \dots, 10 M_{\odot}$$

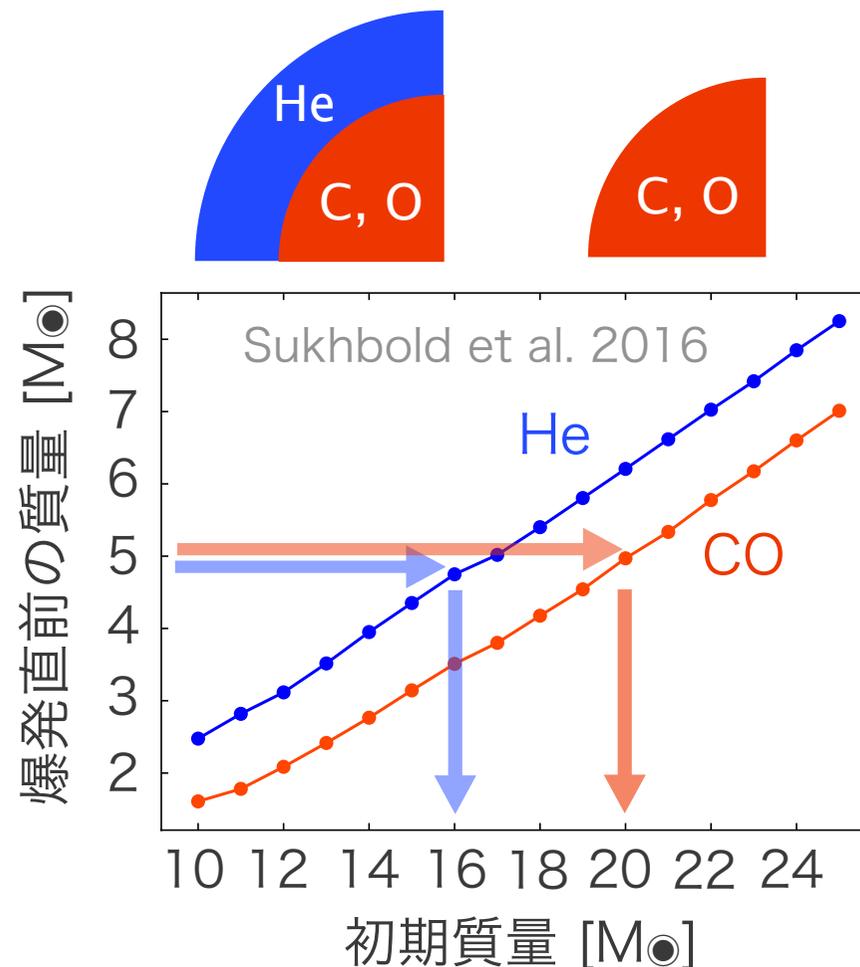
② エネルギー

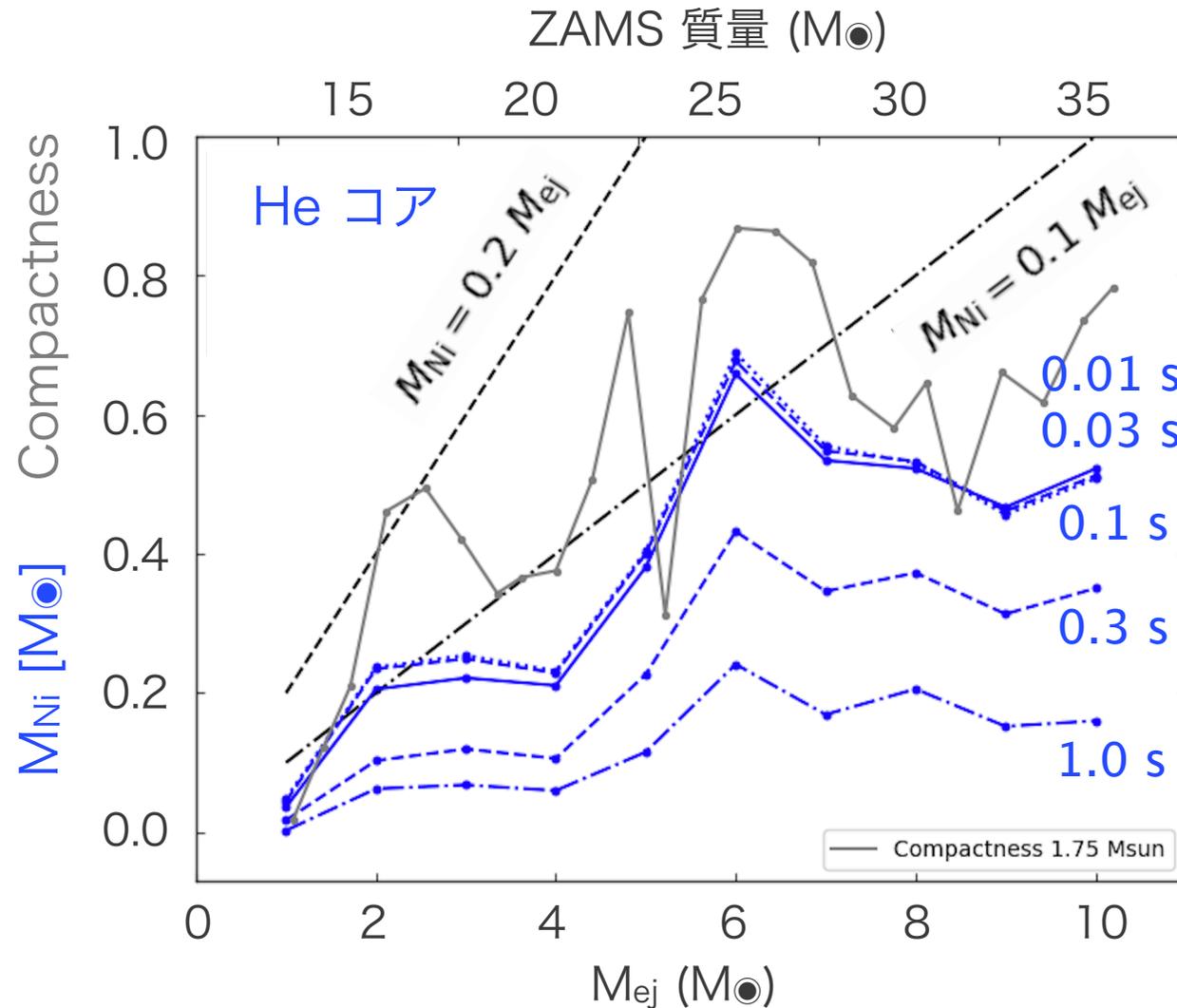
$$E_k = \frac{3}{10} M_{\text{ej}} v_{\text{ej}}^2 \quad (v_{\text{ej}} = 10,000 \text{ km/s})$$

$$\dot{E}_{\text{in}} = \frac{E_k - (E_{\text{bind}} + E_{\text{int}})}{t_{\text{grow}}}$$

③ 爆発のタイムスケール

$$t_{\text{grow}} = 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1.0 \text{ 秒}$$

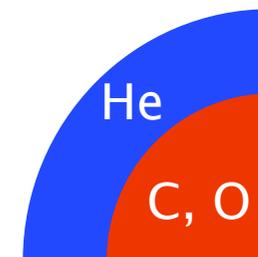




Compactness

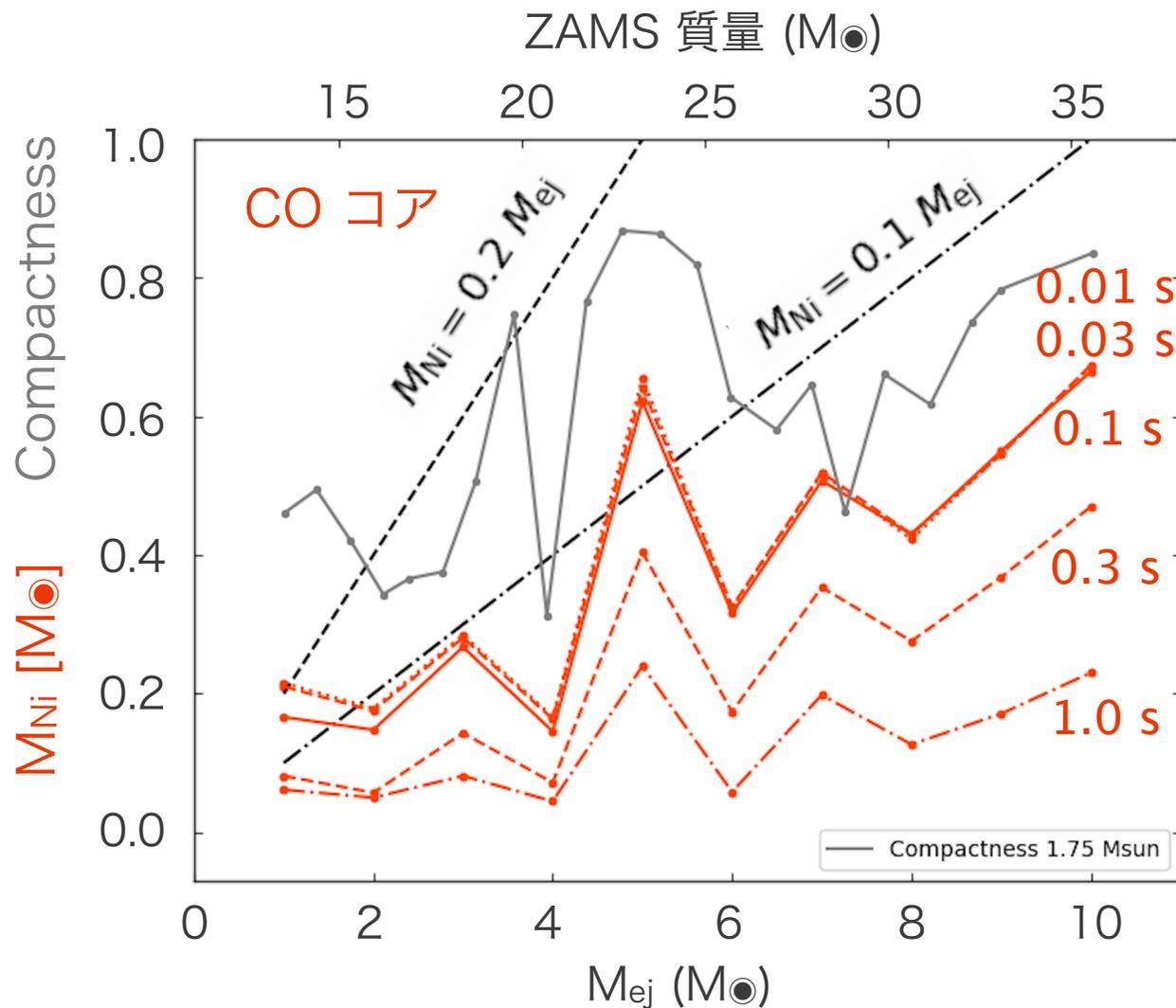
$$\xi_M = \frac{M/M_{\odot}}{R(M)/1000\text{km}}$$

爆発のタイムスケール



- $M_{\text{Ni}}$  は compactness に対応
- $M_{\text{Ni}} \lesssim 0.2 M_{\text{ej}}$

$t_{\text{grow}} = 0.1, 0.3, 1.0$  秒  
を観測の結果と比較



Compactness

$$\xi_M = \frac{M/M_\odot}{R(M)/1000\text{km}}$$

爆発のタイムスケール



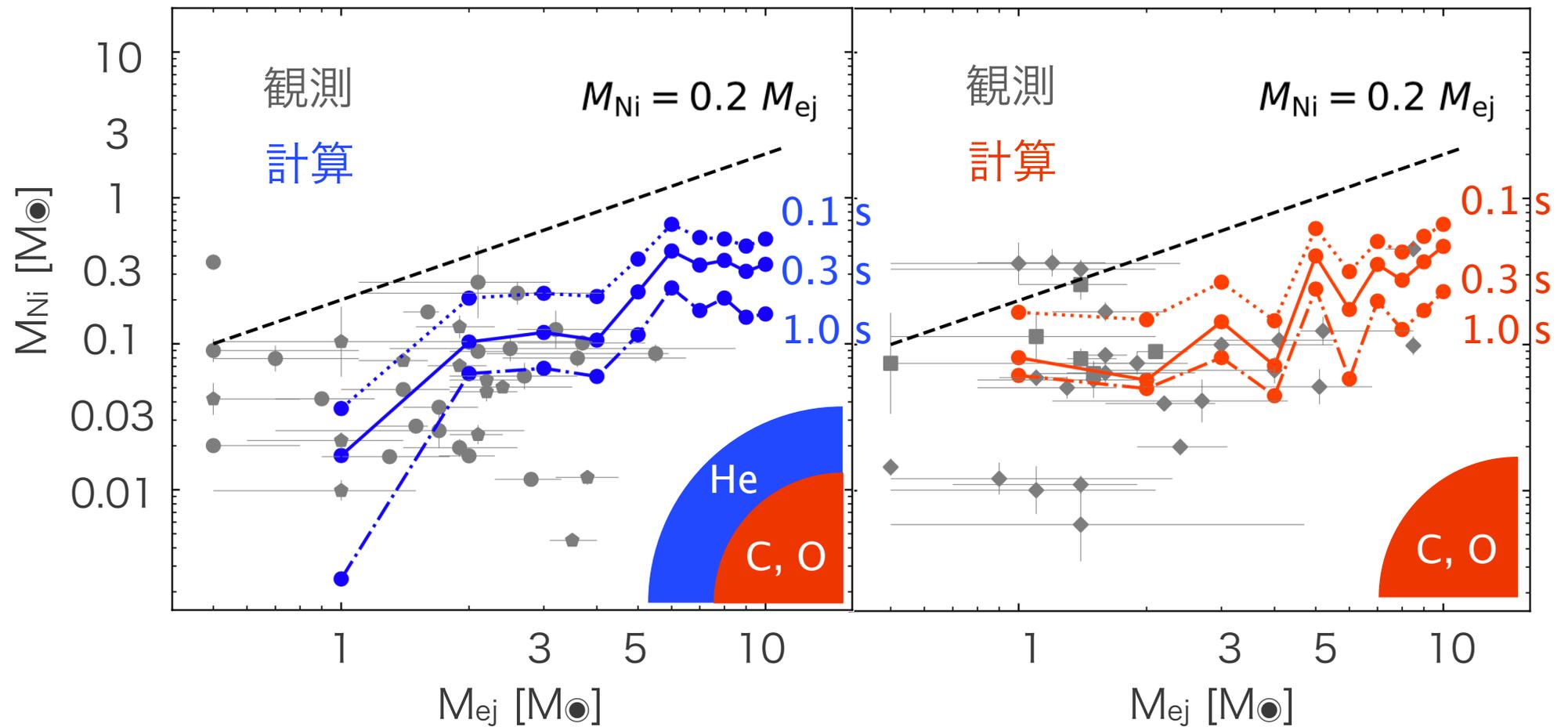
- $M_{\text{Ni}}$  は compactness に対応
- $M_{\text{Ni}} \lesssim 0.2 M_{\text{ej}}$

$t_{\text{grow}} = 0.1, 0.3, 1.0$  秒  
を観測の結果と比較

爆発のタイムスケールと  $^{56}\text{Ni}$  の合成量

IIb & Ib, He コア

Ic & Ic BL, CO コア

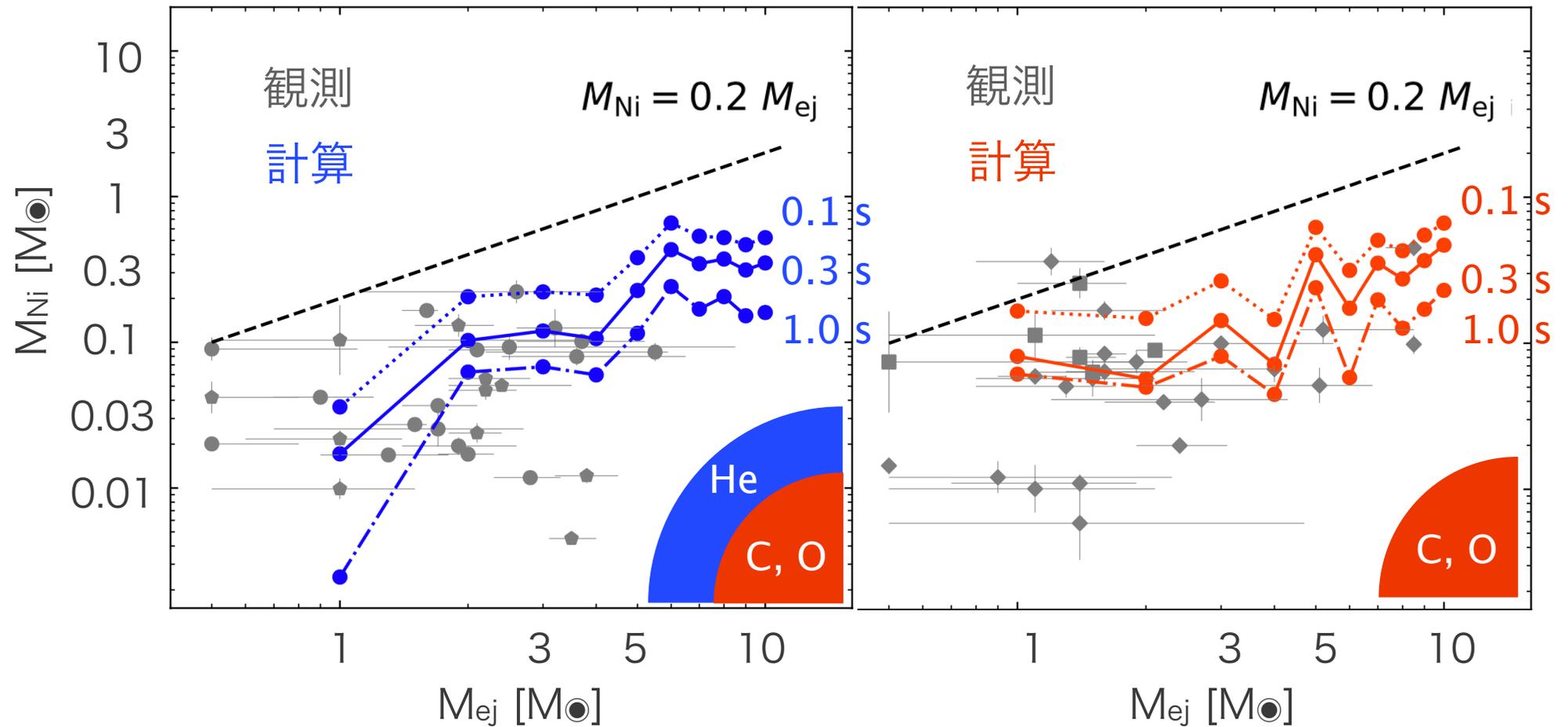


→ 観測バイアスを考慮

$d < 100$  Mpc

IIb & Ib, He コア

Ic & Ic BL, CO コア



**過半数の超新星の  $^{56}Ni$  の質量を説明するには  $t_{grow} < 0.3$  秒**

85 個の超新星の光度曲線

$\Delta t_{1\text{mag}}$  vs  $M_{\text{peak}}$

$M_{\text{ej}}$  vs  $M_{\text{Ni}}$

流体・元素合成計算

$M_{\text{Ni}} \lesssim 0.2 M_{\text{ej}}$

$t_{\text{grow}} \lesssim 0.3 \text{ s}$

